

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2022.04.024

陕西略阳东沟坝多金属矿床地质特征及成矿规律研究

王长春¹,袁攀¹,吴新斌¹,王东¹,陈剑祥^{1,*},崔建军²

(1. 陕西地矿汉中地质大队有限公司,陕西 汉中 723000;2. 中国地质科学院地质力学研究所,北京 100081)

摘要:陕西略阳东沟坝矿床地处“摩天岭地块”东部硖口驿-黑木林中—新元古代基底拼合带北侧,是与晋宁期碧口岛弧海相火山岩相关的金-银-铅-锌多金属中型矿床。笔者较系统地梳理了矿床地质特征,综合矿床最新勘查成果和前人科研资料,在深入坑道考察和开展硫同位素测试分析的基础上,进行了矿床的成矿期次划分、成矿物质来源、矿床成因分析等方面的成矿规律研究。结果表明:①矿床产于新元古代碧口岩群岛弧火山岩中,具多期矿化叠加特征;成矿期次主要包括 3 个阶段:石英-黄铁矿-闪锌矿初始预富集成矿阶段;金-银-重晶石主要成矿阶段;重晶石-碳酸盐晚期成矿阶段。②矿(岩)石硫同位素具有 $\delta^{34}\text{S}$ 重晶石 $>$ $\delta^{34}\text{S}$ 黄铁矿 $>$ $\delta^{34}\text{S}$ 闪锌矿 $>$ $\delta^{34}\text{S}$ 方铅矿特征,证明矿床形成时硫同位素分馏已基本达到平衡;硫同位素 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值普遍具花岗质岩浆硫特征,仅有少量处于幔源硫区间,表明东沟坝矿床硫可能主要来源于下地壳岩浆源,仅有少量的地幔物质混入;而其成矿物质可能主要来自于晋宁期岛弧火山岩浆作用。③东沟坝矿床为晋宁期海相含矿中酸性火山岩浆热液在多次构造作用叠加形成的矿床,属于典型的火山块状硫化物型(VMS)金银铅锌多金属矿床。④矿床形成于晋宁期活动陆缘背景下,隶属中元古代—新元古代古陆块裂解-汇聚成矿地质事件;推测矿床的成岩、成矿过程可能与晋宁期古扬子东、西部微板块俯冲汇聚、后续构造叠加延续有关。

关键词:东沟坝多金属矿床;地质特征;成矿规律;硫同位素;陕西略阳

中图分类号:P618 文献标志码:A 文章编号:1009-6248(2022)04-0300-16

Study on Geological Characteristics and Metallogenic Regularity of the Donggouba Polymetallic Deposit in Lueyang, Shaanxi Province

WANG Changchun¹, YUAN Pan¹, WU Xinbin¹, WANG Dong¹, CHEN Jianxiang^{1,*}, CUI Jianjun²

(1. Shaanxi Geological and Hanzhong Geological Brigade Co., Ltd., Hanzhong 723000, Shaanxi, China;

2. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: The Donggouba deposit is located at north margin of Xiakouyi-Heimulin Meso-Neoproterozoic basement structure zone, east of the Motianling block. It is a special Au - Ag - Pb - Zn polymetallic medium deposit related to the Marine volcanic rocks of Bikou island arc in the Jinning Period. By integrating the latest progress on the exploration and previous scientific research data, we systematically summarized the geological characteristics of deposit, investigated the pits, analyzed the sulfur isotope of the ores and, finally, studied the metallogenic regularity of the deposit

收稿日期:2021-11-24;修回日期:2022-04-14;网络发表日期:2022-11-15;责任编辑:李辉

基金项目:陕西地矿汉中地质大队地质科研专项资金项目(HZKY202101)资助。

作者简介:王长春(1984-),男,工程师,长期从事矿产勘查工作。E-mail:574239006@qq.com。

* 通讯作者:陈剑祥(1970-),男,正高级工程师,从事矿产勘查及矿床地质研究工作。E-mail:457965662@qq.com。

in terms of the classification of metallogenic periods, tracing the metallogenic materials and the genetic analysis of the deposits. The main results are as follows: ①the deposit is located within the Neoproterozoic volcanic arc rocks of Bikou Group, and is characterized by multi-stage mineralization superimposition. The mineralization process mainly include three stages: quartz-pyrite-sphalerite initial pre-enrichment mineralization stage; gold-silver-barite main mineralization stage; barite-carbonate late mineralization stage. ②the sulfur isotope($\delta^{34}\text{S}$) of minerals show an order of barite > pyrite > sphalerite > galena, which suggests that the sulfur isotope fractionation had basically reached equilibrium when the deposit was formed. The $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ values of the Donggouba deposit generally display the characteristics of granitic sulfur with a small quantity of mantle-derived sulfur, indicating that the sulfur in Donggouba deposit may be dominantly derived from the lower crust magma source with minor mantle material. The sources of the ores may come from the volcanic magmatism of the Jinning island arc. ③Donggouba deposit is formed by the polyphase tectonic superimposition of ore-bearing hydrothermal fluids derived from Marine intermediate-acid volcanic rocks in the Jinning period. It is a typical volcanic massive sulfide(VMS) type gold, silver, lead and zinc polymetallic deposit. ④the deposit formed on the active continental margin in Jinning Period, and belongs to the metallogenic geological event related to the breakup and assembly of the Meso-Neoproterozoic ancient continental blocks. It is speculated that the diagenesis and mineralization process of the deposit could be caused by the subduction and convergence of the eastern and western ancient Yangtze microplates and the subsequent tectonic superposition during Jinning period.

Keywords: Donggouba polymetallic deposit; geologic feature; genesis of deposit; sulfur isotope; Lueyang, Shaanxi province

陕西略阳东沟坝矿床处于陕甘川三省接壤处的“摩天岭地块”,属区内鲜见且独具特色的金-银-铅-锌多金属矿床。自1981年被发现,1991年完成勘探,是一个金-银-锌矿达中型规模、共生铅、重晶石为小型规模的同体共生矿床。近几年,矿山在深部勘探扩储中又发现多条矿体,其中,仅Zn101矿体已达中型,显示区内深部隐伏矿产资源潜力较大。

多年来,众多学者对东沟坝矿床开展过很多科研工作,主要从矿床的地球化学、成矿物理化学条件、同位素地球化学及成因等方面进行了研究,已取得了以下认识:①成矿物质主要来自赋矿的火山岩(邱柱国等,1990;汪东波等,1991;丁振举等,2003)。②成矿热液为250℃以上的高中温、高盐、中性,在相对还原条件下成矿(汪东波,1991;卢武长等,1998;丁振举等,2003)。③单阶段铅同位素模式年龄介于858~1 042Ma,相当于青白口纪;矿床成矿与古火山热液喷流沉积作用有关,受到区域变质变形作用的改造;变质流体参与了后期改造成矿过程,属火山喷流沉积-受变质型(邱国柱等,1990;汪东波

等,1991;刘永丰等,1991;卢武长等,1998;丁振举等,2003)。

笔者基于矿床目前实际的开采、勘查现状,在继承前人研究成果的基础上,综合本区最新的区域研究成果(徐学义等,2014;陕西省地质调查院,2017;董王仓等,2019a;李维成等,2020),类比国内外典型矿床研究资料(陈毓川等,1993;裴荣富,1995;毛景文等,2012),并结合笔者深入坑道考察所得和硫同位素研究认识,开展了矿床成矿期次划分、成矿物质来源、矿床成因分析等方面的研究,对矿床成矿规律理论研究进行了补充、完善。这些资料对深入认识东沟坝矿床成矿过程、成矿规律,厘定矿床成因类型以及指导找矿勘探具有参考价值。

1 区域成矿背景

矿床大地构造背景处于可可西里-巴颜喀拉造山带(Ⅱ级构造单元)之下的摩天岭地块(Ⅲ级构造单元)东缘,形态面貌为西宽东窄的三角状,构造变

形具有西弱东强的态势(图1)。

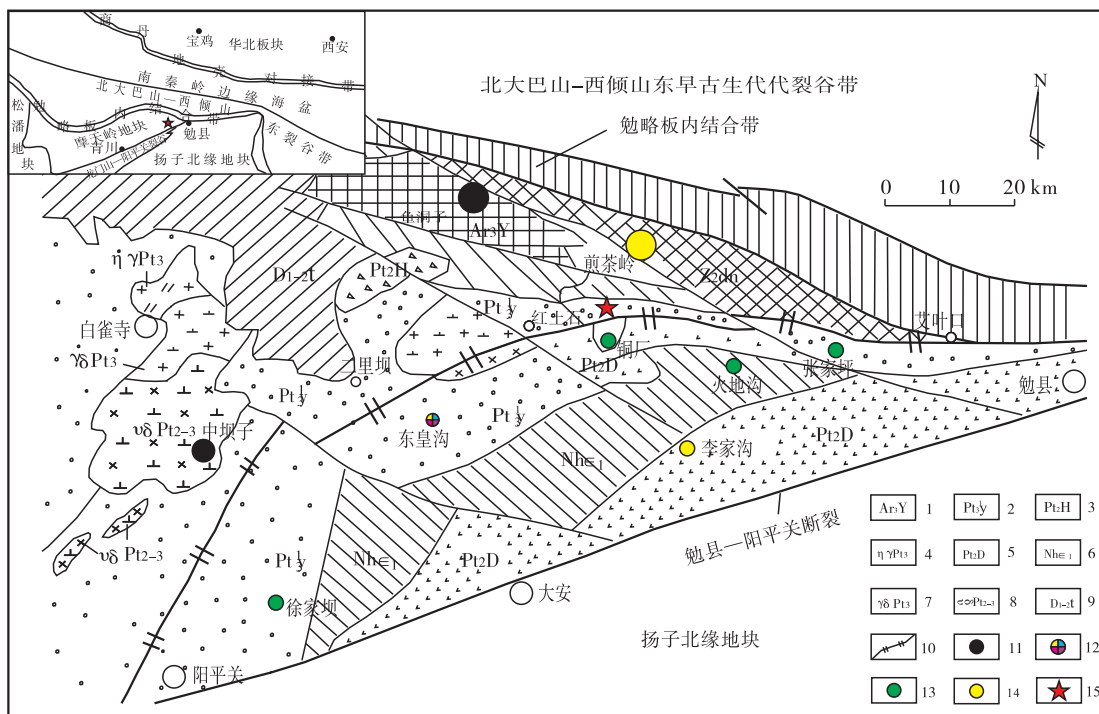
摩天岭地块在新元古代属大陆边缘古岛弧;在晋宁期,是古扬子西部微板块由西北朝东南向古扬子东部微板块下俯冲-碰撞而成(造就了硤口驿-黑木林基底拼合带),于印支期封闭为摩天岭造山带;在喜山期随青藏高原东北部整体向北东强烈推挤,呈构造块体嵌入南秦岭与扬子陆块北缘之间(徐学义等,2014;陕西省地质调查院,2017)。

略阳东沟坝矿床位于由勉略板内结合带、勉县-阳平关断裂构造挟制的摩天岭地块东北的“勉-略-阳”三角地区(图1)。据多年的研究结果,将该三角区划分为3个主要演化阶段:①晚太古代—早中元古代结晶基底和浅变质过渡基底形成阶段。②中晚元古代—早古生代扬子板块北部大陆边缘演化阶段。③中新生代陆内构造演化阶段(王根宝等,1996;陕西省地质调查院,2017)。

“勉-略-阳”三角地区基底地层包括结晶基底和褶皱基底。结晶基底为太古宙鱼洞子岩群中深变质火山-沉积岩系(同位素年龄为2 645~2 703 Ma)

(秦克令等,1992;张宗清等,2001;张欣等,2010;王洪亮等,2011),是汉中地区最主要的富铁矿产出层位(王洪亮等,2011),如鱼洞子大型铁矿;褶皱基底为元古宙何家岩岩群(同位素年龄2 200 Ma)(张宗清等,1996)、大安岩群(同位素的年龄为1 624~1 836 Ma)(张宗清等,1996;张宗清等,2002)和碧口岩群(同位素年龄为776~846 Ma)(闫全人等,2003;赖绍聪等,2007),形成了明显的过渡基底变质、变形地层,由一套巨厚变基性火山岩、变酸性火山岩和碎屑岩组成;该褶皱基底是摩天岭地块贵金属、有色金属矿产的重要矿源层(陕西省地质调查院,2017);“勉-略-阳”三角地区盖层主要为南华系—寒武系浅海相碎屑岩-碳酸盐岩沉积。

该三角区历经多期次构造演化,构造较为发育。区域性褶皱构造主要包括黑木林-七里沟复背斜和徐家坝-火地沟向斜;区域性构造主要有勉县-阳平关断裂和略阳-勉县断裂,各次级断裂众多,以北东向和北西向为主。岩浆活动期次多、种类全,从超基性至酸性侵入体均有发育,具有多期侵入的特征;



1. 鱼洞子岩群;2. 碧口岩群阳坝组;3. 何家岩岩群;4. 二长花岗岩;5. 大安岩群;6. 南华系—寒武系盖层;
7. 花岗闪长岩;8. 辉长-闪长杂岩体;9. 踏坡组;10. 硤口驿-黑木林基底拼合带;11. 铁矿床;12. 多金属矿床;
13. 铜矿床;14. 金矿床;15. 研究区位置

图1 东沟坝矿床大地构造位置图

Fig.1 The tectonic location of Donggouba ore deposit

其中,以晋宁期最为频繁,其次为华力西期。总之,复杂的地质背景、长期构造演化历程形成了该区有利的成矿、控矿地质背景条件。

本区域矿产资源丰富,隶属秦岭成矿带6个主要矿集区之一。金属矿产有金、银、铅、锌、铁、铜、镍等。东沟坝矿床即处于“勉-略-阳”东部碧口岛弧火山岩中,属于典型的与火山作用关系密切的金-银-铅-锌多金属矿床。

2 矿区地质

矿区位于“勉-略-阳”三角地区东部硤口驿-黑木林中新元古代基底拼合带北侧(图1)。出露地层主要为上元古界碧口岩群阳坝岩组上岩段($Pt_{31}y^3$),由一套变中酸性火山熔岩、火山碎屑岩为主体的浅海相中酸性角斑岩系组成。其火山熔岩主要为流纹斑岩、石英角斑岩;火山碎屑岩主要是流纹质凝灰岩。火山作用类型以喷溢相为主,次为火山爆发岩相、沉积相;其韵律的特点具下部多以偏中-基性熔岩、集块熔岩或以粗粒度火山碎屑岩开始,向上岩性酸度增加,火山碎屑岩增多,粒度变细。赋矿层岩相具喷溢-沉积特征,矿体均赋存于碧口群阳坝岩组上岩段第三岩性层中。矿区褶皱主要为黑木林-七里沟复背斜的北翼——东沟坝单斜,倾向北北东($5^\circ\sim 30^\circ$),倾角 38° 。

矿区断裂构造以近东西走向断裂为主,可分为成矿前断裂和后期断裂2类。成矿前断裂以挤压和揉皱破裂为主要表现形式,为相互平行的近东西向挤压破碎带,在构造中形成揉皱弯曲转折端,在脱顶空间填充了脉状锌硫矿体(条),形成了早期(含矿)绢英岩矿化构造蚀变带;后期断裂为成矿前构造的后期叠加,总体可分为2种:①是平行矿化带产出的走向断裂,数量多但规模不大。②为北东向的顺扭压性断裂。它们对矿体均无大的影响。需要强调的是,后期构造叠加引起的矿液运移活动使早期矿化构造带中又叠加贮存了似层状、透镜状等大小不等的金-银-铅-锌-重晶石同体共生矿体、单锌矿体、单银矿体及单金矿体等。而区内诸矿体呈平面波浪状延伸,具纵向膨缩、横向分支复合等形迹特征,均反映了矿化构造带具先压后扭、局部兼张的多次构造运动的复合形变特点。

矿区岩浆作用不甚发育,主要为石英钠长岩和

次安山岩少量活动。

矿区碧口岩群火山岩系普遍遭受低级变质作用,变质相为低温绿片岩相。

3 矿床地质

3.1 矿化蚀变带特征

在矿床内共圈定11条矿化蚀变带,由I号矿化蚀变带向北6条(I~VI)出露地表,向南5条(VII~XI)隐伏地下;各蚀变带规模大小不一,长度从数十米至千余米,宽数米至百余米;多呈近东西向平行展布,倾向 $5^\circ\sim 15^\circ$,倾角 $45^\circ\sim 60^\circ$,具尖灭再现和分支复合现象;在横断面上呈顺时针向斜列,纵断面上具向东倾伏的趋势,圈定的矿体均赋存其内(图2、图3、图4)。

在各矿化蚀变带中,与成矿有关的蚀变主要有硅化、绢云母化、黄铁矿化和重晶石化等。蚀变岩石主要由黄铁绢英岩、重晶绢英岩、闪锌矿化绢英岩及绢英岩化火山岩组成。其中,黄铁绢英岩、重晶绢英岩分布最广,是工业矿体产出的主要蚀变围岩。

矿床内以I号矿化蚀变带规模最大,矿化最佳,Ⅶ号矿化蚀变带次之,其他规模较小。

I号矿化蚀变带中以锌矿化范围最大,并呈强烈片理化、糜棱岩化;其西起28线以西,东至31线以东,长1700m,地表宽10~30m,最宽50m,深部宽度增大,一般为40~60m,最宽达120m,呈大透镜状,沿走向呈波浪状延伸,向东侧伏,总体走向 $272^\circ\sim 278^\circ$,倾向北北东,倾角 $46^\circ\sim 60^\circ$;在其内圈出各类矿体20个。

Ⅶ号矿化蚀变带分布于I号矿化蚀变带之南,为一隐伏矿化蚀变带,长1000m,宽10~40m,呈似层状平行I号矿化蚀变带产出;在其间圈出各类矿体11个。

3.2 矿体特征

在该矿床中共圈定各类矿体78个,主要分为金-银-铅-锌-重晶石同体共生矿体、单锌矿体、单银矿体、单金矿体等4大类(谢元清等,1991;王兴堂等,2010)。据资料显示,矿床中工业价值最好,规模较大的主要为金-银-铅-锌-重晶石同体共生矿体和单锌矿体,并以锌矿体的规模最大;金-银-铅-锌-重晶石矿体产出位置相对较浅,而锌矿体则多赋存在蚀变带的较深地段。

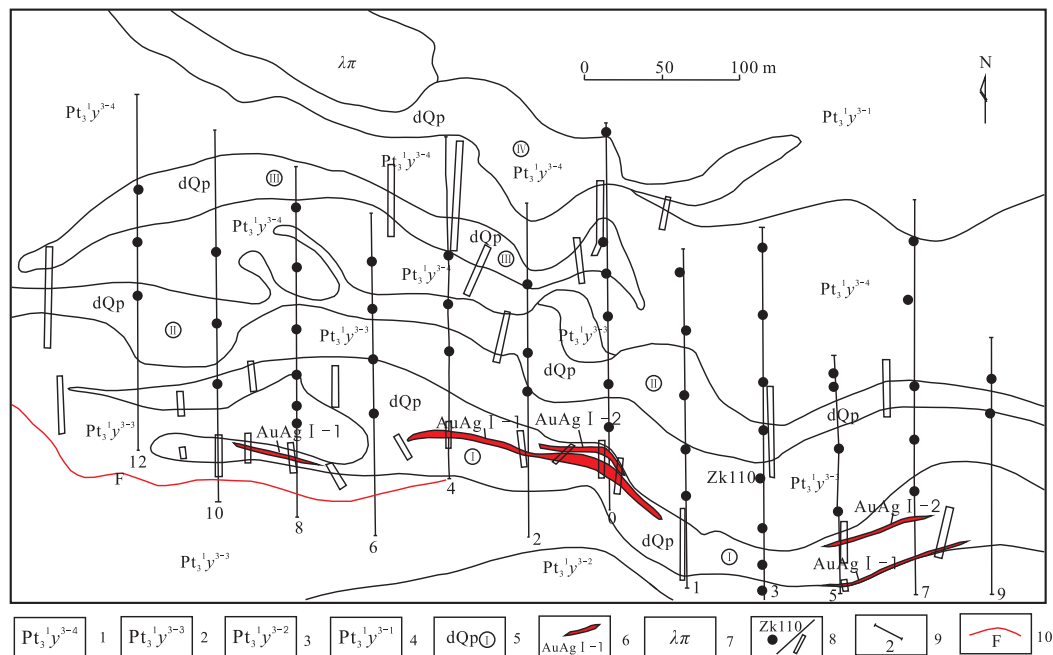


图2 东沟坝多金属矿床地质略图

Fig. 2 Schematic map showing geology of the Donggouba polymetallic deposit

1. 碧口岩群阳坝岩组上岩段第四岩性层(中酸性角砾凝灰岩为主,爆发、喷溢、沉积相);
2. 碧口岩群阳坝岩组上岩段第三岩性层(凝灰含英角斑岩、含英角斑岩为主,喷溢、沉积相);
3. 碧口岩群阳坝岩组上岩段第二岩性层(集块角斑岩夹凝灰角斑岩为主,喷溢相);
4. 碧口岩群阳坝岩组上岩段第一岩性层(集块角斑岩为主,爆发相);
5. 矿化蚀变带及编号;
6. 金银铅锌重晶石多金属矿体及编号;
7. 石英钠长斑岩;
8. 钻孔、探槽位置;
9. 勘探线及编号;
10. 断层

主矿体主要分布在 12-0-19 线间。地表仅出露 $AuAg I-1$ 、 $AuAg I-2$ 矿体,其余均为盲矿体;矿体多呈似层状、透镜状、脉状产出,产状变化较小,沿倾向、走向具舒缓波状特点;矿体间呈左行阶梯状斜列式,向南东方向递降展布。所有矿体均产出于矿化蚀变带内,产状与其基本一致,多数矿体倾向北北东($5^\circ \sim 15^\circ$),倾角中等($45^\circ \sim 55^\circ$);矿体厚度薄-中等,一般变化不大,仅局部地段矿体厚度大于 15 m;金-银矿石品位为贫-中,多数品位介于 $1 \times 10^{-6} \sim 10 \times 10^{-6}$;锌矿石平均品位为 5×10^{-2} 左右。

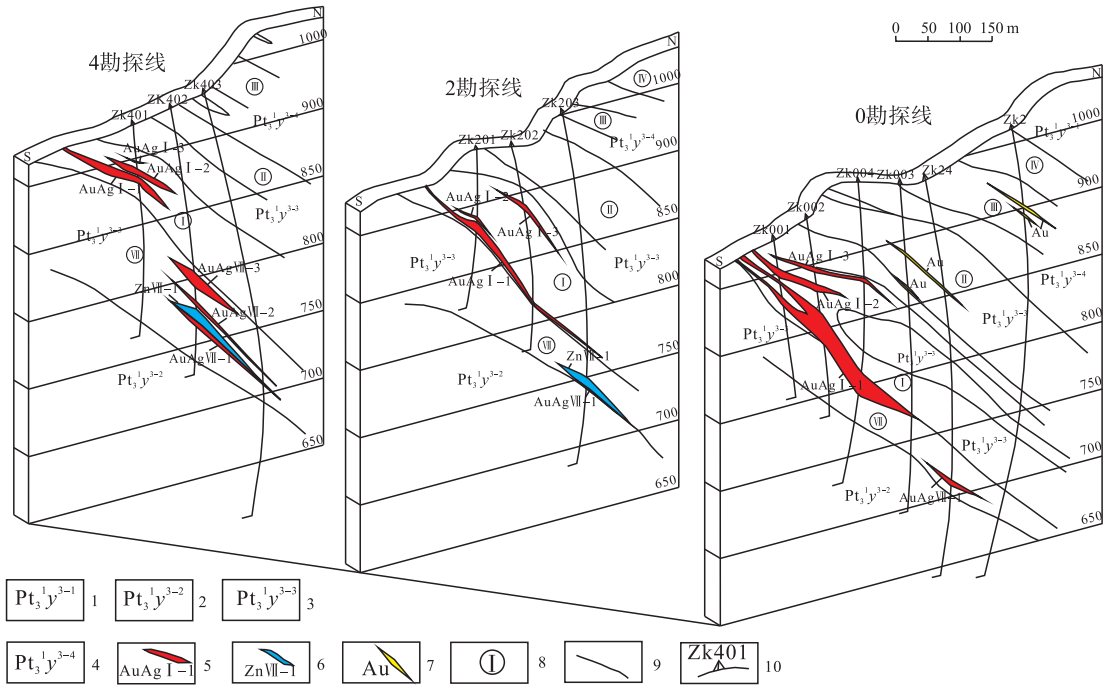
3.2.1 金-银-铅-锌-重晶石多金属同体共生矿体

在矿床中圈定 14 个金-银-铅-锌-重晶石同体共生矿体,最具工业价值;矿体呈群、呈条(带)产出,平行斜列展布,侧现间距 20~40 m;矿体形态较为规整,平面上呈似层状或条带状舒缓波状展现,剖面上呈透镜状、似层状产出,个别矿体呈尖灭再现或膨胀脉状产出;其赋矿岩性主要为凝灰含英角斑岩(蚀变后为重晶绢英岩),其碎屑含量、粒度变化较大,局部相变为集块含英角斑岩和中酸性火山凝灰岩;主要矿体为 $AuAg I-1$ 、 $AuAg VII-1$ (谢元清,1991),

主要赋存于 850 m 标高以上或 700~800 m 标高之间(图 3)。

$AuAg I-1$ 矿体:产出于 I 号矿化蚀变带,展布于 10-0-9 勘探线间,总长度 505 m,地表断续出露长 308 m;矿体呈周边薄、中间厚的透镜状产出,走向 275° ,倾向北北东,倾角 $45^\circ \sim 60^\circ$,850 m 标高以上矿体较陡,向下有变缓趋势;矿体最大延深 186 m(0 线),东西两端延深较浅,平均厚度 4.45 m,矿体沿走向和倾斜方向均是中间厚两端薄;矿体平均品位: Au 为 3.41×10^{-6} , Ag 为 194.86×10^{-6} , Pb 为 1.80×10^{-2} , Zn 为 3.06×10^{-2} , $BaSO_4$ 为 29.51×10^{-2} (图 3)。

$AuAg VII-1$ 矿体:属隐伏盲矿体,产出于 VII 号矿化蚀变带,主体分布在 8-0-7 勘探线间,全长 425.5 m,平均宽度 2.7 m,呈透镜状产出;矿体位于 792~696 m 标高范围内,控制延深小于 100 m;总体走向 280° ,倾向北北东,倾角一般为 $42^\circ \sim 45^\circ$,局部为 58° ,矿体平均厚度 2.70 m;平均品位: Au 为 4.65×10^{-6} , Ag 为 117.25×10^{-6} , Pb 为 1.55×10^{-2} , Zn 为 4.70×10^{-2} , $BaSO_4$ 为 25.67×10^{-2} (图 3)。



1. 碧口群阳坝岩组上岩段第一岩性层:中酸性火山集块岩(爆发相);2. 碧口群阳坝岩组上岩段第二岩性层:含集块角斑岩、凝灰角斑岩(喷溢相);3. 碧口群阳坝岩组上岩段第三岩性层:凝灰含角斑岩夹凝灰质板岩(喷溢、沉积相);4. 碧口群阳坝岩组上岩段第四岩性层:中酸性火山角砾凝灰岩夹角斑岩、凝灰质板岩(爆发、喷溢、沉积相);5. 金银铅锌重晶石多金属矿体及编号;6. 锌矿体及编号;7. 金矿体及编号;8. 矿化蚀变带编号;9. 地质界线;10. 钻孔位置及编号

图 3 东沟坝矿床 0、2、4 勘探线剖面图

Fig. 3 The prospecting at 0, 2 and 4 lines profile map of Donggouba deposit

3.2.2 单锌矿体

在矿床内共圈定 27 个单锌矿体,包括早期探明的 ZnVII-1、ZnVII-2 等较大矿体,但尤以新探明的 Zn101 矿体规模最大,也是矿床中最大的锌矿体(王兴堂,2010);其分布在矿区东北部Ⅶ号矿化蚀变带中,该矿化蚀变带控制长度 1 000 m,矿体分布在 1~13 勘探线之间,最小埋深 143 m(5 线),最大埋深 253 m(9 线),产出于 700~800 m 标高地段(图 4);含矿岩性为绢英岩(原岩为酸性凝灰岩、酸性熔岩);矿体长 408 m,沿倾向最大延深 205 m,厚度 2.74~19.11 m,平均 12.23 m;呈似板状、扁平透镜状产出,向东侧状,侧状角 30°左右,矿体总体走向 270°~90°,倾向北东,倾角 33°~57°,矿体上部较陡,下部较缓;矿体平均品位:Zn 为 5.12×10^{-2} ,伴生 Au 为 0.65×10^{-6} ,Ag 为 29.59×10^{-6} ,Pb 为 0.11×10^{-2} 。

3.3 矿石特征

3.3.1 矿石成分

矿石矿物组分比较复杂,金属矿物有 23 种,主要包括银金矿、自然银、闪锌矿、方铅矿、黄铁矿等,

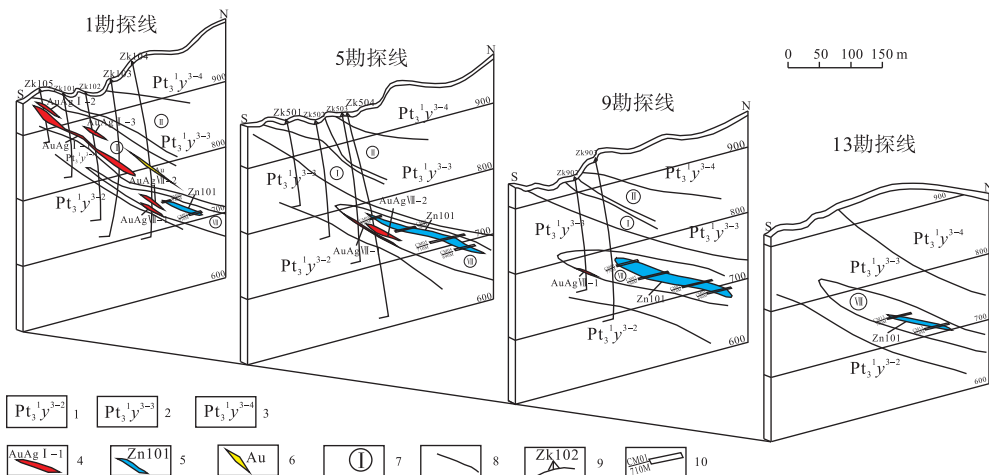
其次有自然金、银金齐、金银矿、辉银矿、脆银矿、银黝铜矿,少量黄铜矿、磁黄铁矿、磁铁矿、辉铜矿、斑铜矿等;脉石矿物有 25 种,主要有绢云母、石英、重晶石、绿泥石、钠长石、白云石、方解石等。不同类型的矿体矿物组合存在差异。

3.3.2 矿石自然类型

区内有益元素较多,根据矿物及元素组合特征,将矿石自然类型主要分为黄铁绢英岩型、硅化重晶绢英岩型及重晶石(脉)型矿石等 3 类,并以前 2 种类型为主和最为重要(图 5)。

(1)黄铁绢英岩型矿石:是以硅化、绢云母化为标志的锌矿石为主(图 5a₁、图 5a₂),其规模大、分布广,为矿床的主要矿石类型和当前矿山利用的主要对象;金属矿物主要为黄铁矿、闪锌矿,其次为方铅矿、金-银矿物系列,偶见黄铜矿;脉石矿物为石英、绢云母、绿泥石等;矿石具残留结构、变余火山碎屑结构、鳞片变晶结构,片状构造。

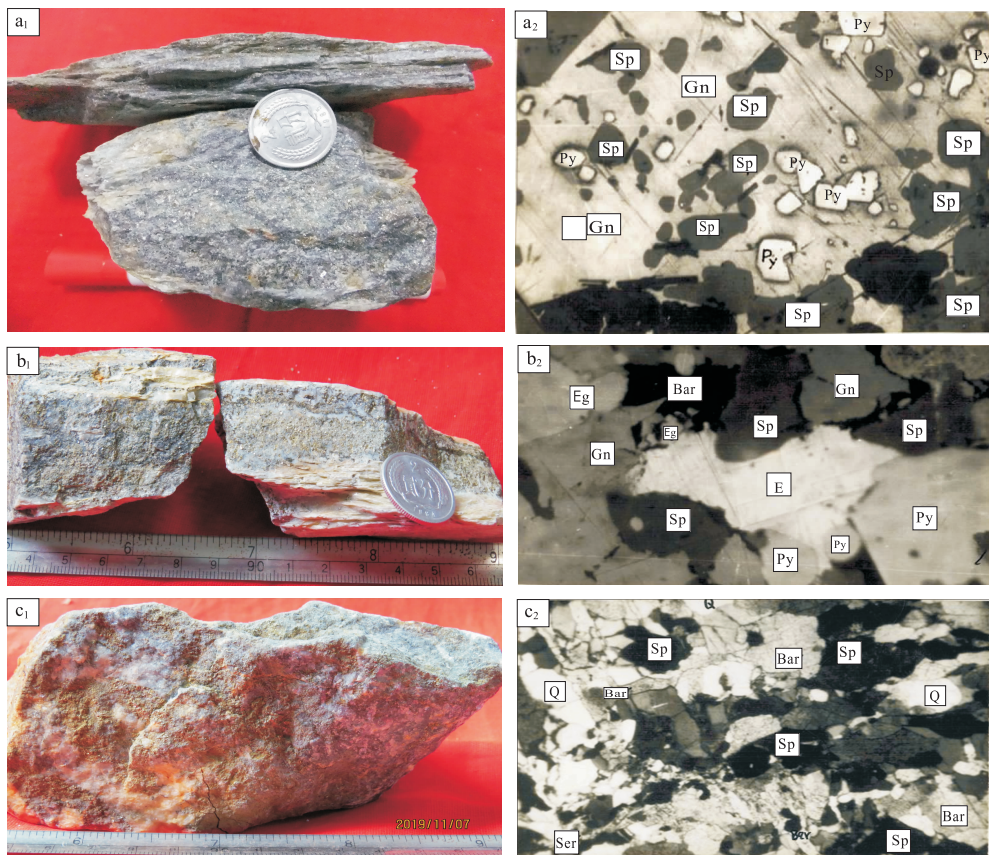
(2)硅化重晶绢英岩型矿石:以金-银-铅-锌-钡矿石为主且最具工业价值(图 5b₁、图 5b₂),次为少量



1. 碧口岩群坝坝岩组上岩段第二岩性层:含集块角斑岩、凝灰角斑岩(喷溢相);
2. 碧口岩群坝坝岩组上岩段第三岩性层:凝灰含英角斑岩夹凝灰质板岩(喷溢、沉积相);
3. 碧口岩群坝坝岩组上岩段第四岩性层:中酸性火山角砾凝灰岩夹角斑岩、凝灰质板岩(爆发、喷溢、沉积相);
4. 金银铅锌重晶石多金属矿体及编号;
5. 锌矿体及编号;
6. 金矿体编号;
7. 矿化蚀变带编号;
8. 地质界线;
9. 钻孔位置及编号;
10. 穿脉巷道及编号

图4 东沟坝矿床1、5、9、13勘探线剖面图

Fig. 4 The prospecting at 1, 5, 9 and 13 lines profile map of Donggouba deposit



E. 银金矿;Py. 黄铁矿;Gn. 方铅矿;Sp. 闪锌矿;Bar. 重晶石;Eg. 银黝铜矿;Q. 石英;Ser. 绢云母;a₁、a₂. 绢英岩型锌矿石;b₁、b₂. 重晶绢英岩型金银铅锌钡矿石;c₁、c₂. 重晶石(脉)型金银钡矿石

图5 东沟坝矿床矿石类型图

Fig. 5 Photographs of typical ores from Donggouba tin deposit

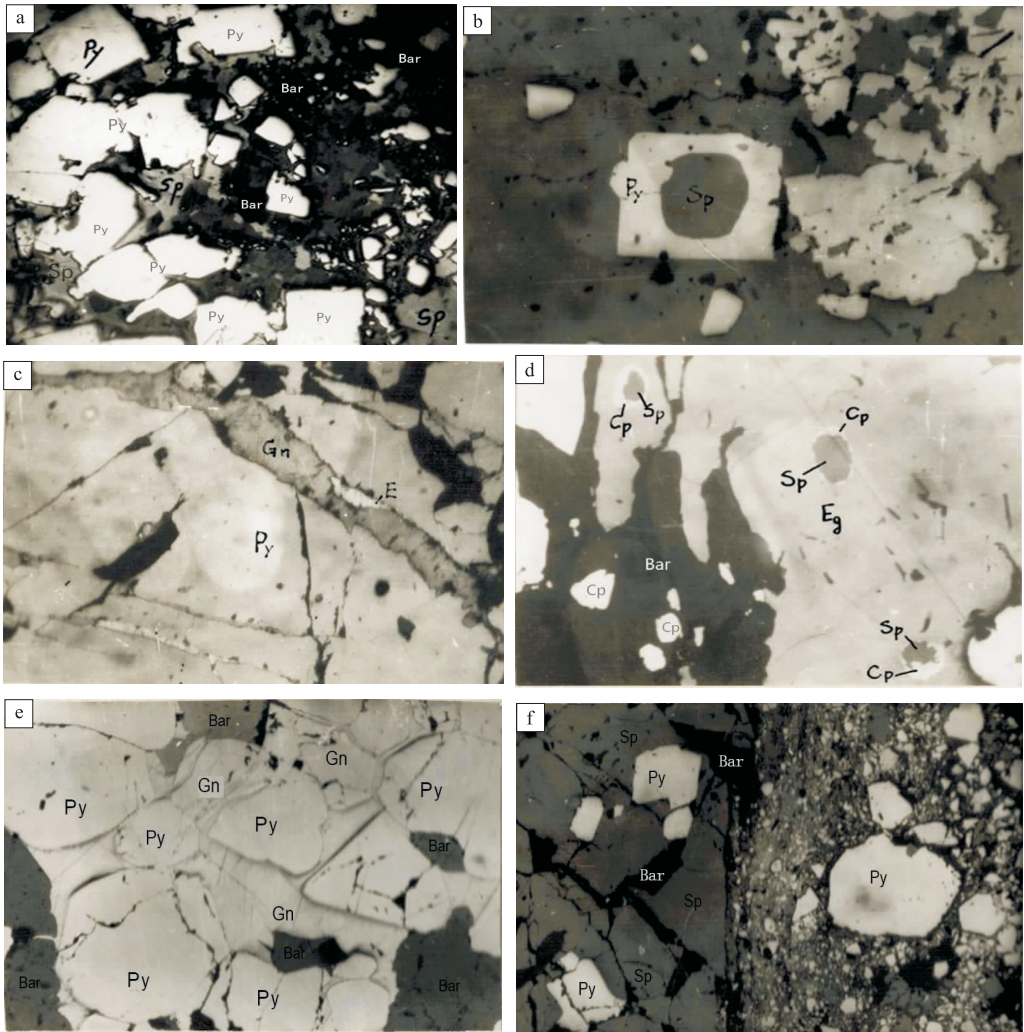
金矿石、银矿石类型;金属矿物达 23 种,以金-银矿物系列、闪锌矿、方铅矿、黄铁矿等为主;脉石矿物多为重晶石、石英、绢云母、长石、绿泥石;有用矿物为金-银系列矿物、闪锌矿、方铅矿、重晶石及黄铁矿;金银矿物多以细粒状嵌布于重晶石和方铅矿矿物粒间或其裂隙间;本类矿石是在前述矿石的基础上,再次矿化叠加生成,故多以碎裂、填隙、交代结构为主,角砾状、细脉浸染状构造常见,次为块状、片状构造。

(3)重晶石(脉)型矿石:主要为 $BaSO_4 > 60\%$ 的金-银-钡矿石类型(图 5c₁、图 5c₂),紧邻硅化重晶绢

英岩型矿石,呈脉状产出,占比仅为 2%~3%。

3.3.3 矿石微观结构

(1)矿石结构:细晶粒状结构(图 6a)为矿床全部金属矿物及多数非金属矿物所共有,反映早期喷气-喷液为主的物理化学条件;填隙结构、交代结构(图 6b、图 6c、图 6d)在本区 80%的金银矿物及多金属矿物的晶隙、裂纹中出现,说明本期次成矿作用以充填贯入为主要方式;而碎裂结构、斑状压碎结构(图 6e、图 6f)在矿石中最少,是矿床在后期构造应力改造作用下,矿物产生不规则形变的直观反映。



a. 半自形晶粒状结构,浸染状构造——由自形程度高的黄铁矿(Py)与他形晶粒状闪锌矿(Sp)组成;b. 交代散晶结构:晶体完好的黄铁矿(Py)中央被交代作用生成的闪锌矿(Sp)占据;c. 碎裂及填隙结构:银金矿(E)、方铅矿(Gn)沿黄铁矿(Py)裂纹叶片状、细脉状产出;d. 包含与交代(反应边)结构:银黝铜矿(Eg)中,包含有黄铜矿(Cp),及具交代反应边的闪锌矿(Sp);e. 碎裂结构:早期黄铁矿(Py)受力产生的裂纹中,有后生细脉状方铅矿(Gn)充填交代;f. 斑状压碎裂结构、角砾状构造:黄铁矿(Py)与闪锌矿(Sp)受力碾碎,大小悬殊

图 6 东沟坝矿床矿石光片照片

Fig. 6 The photographs show the polished section of ores from the Donggouba ore deposit

(2) 矿石构造:以浸染状(图 6a)、脉状构造为主,且最为重要。尤其重晶石组成的套脉构造、沿钠长石晶体裂纹生成的平行纹脉状构造及角砾状构造,显示出成矿作用的主要空间和外部条件是后期的构造破碎带;角砾状构造(图 6f)在矿石中少量,属早期矿石破裂后,被后期矿液充填、胶结而成。

3.3.4 主要金属矿物生成顺序

基于大量光薄片观察,发现东沟坝矿床的矿石矿物结晶顺序具有规律性。首先,结晶析出的矿物是黄铁矿,其次是闪锌矿,方铅矿和重晶石结晶较晚,最后结晶析出金-银矿物;其次,同一种矿物显示出多期结晶和重复发育现象。另外,通过观察发现,Au、Ag、Ba 这 3 种元素的析出时间最晚,通常表现为紧密共生关系;Au、Ag 常生成中-细粒状(0.01~0.074 mm)金属(矿物)嵌布(充填)于方铅矿和重晶石矿物之间(或裂隙中)。

3.3.5 金和银的赋存特征

金和银是东沟坝矿石中最重要的 2 种金属,常以类质同象形式构成金-银矿物系列。金、银矿物形态以他形为主,约占 75%,表现为不规则枝状和不规则粒状;金、银矿物比较细小,多数(65%)矿物粒径介于 0.01~0.08 mm。

基于对东沟坝矿床 1 500 粒金、银矿物研究,发现这种矿物系列在矿石中赋存的 3 个特征:①金和银的产出形式以隙金(晶隙金、裂隙金)为主,占总数的 78.12%,其次为包金,占总数的 21.89%。②金和银的矿物系列主要赋存于重晶石(占 81.31%)—方铅矿(占 15.82%)组合中。③电子探针测定结果显示,在重晶石、方铅矿、黄铁矿和闪锌矿等主要矿物内部未发现 Au、Ag 元素。

3.4 成矿期次划分

根据深入矿床巷道考察矿脉的产出特征,观察矿石组构、矿物赋存状态,并结合镜下矿石矿物共生组合、矿物的包裹连生、充填穿插以及溶蚀交代等关系的研究,将矿物成矿期次划分为 3 个阶段(表 1)。

(1) 石英-黄铁矿-闪锌矿阶段:为高温喷气-喷液期,由早期含少量闪锌矿的中酸性火山岩浆沿构造破碎带涌入,成矿时间相对较短,早期形成石英+黄铁矿+闪锌矿矿物组合,多呈半自形-他形晶粒状结构,浸染状、变余火山碎屑构造分布,多被后期形成的方铅矿等硫化物包裹、交代,石英多具较强的油脂光泽,断口多呈贝壳状高温类型。为初始预富集

成矿阶段。

(2) 金-银-重晶石阶段:本阶段成矿时间相对较长。前期在继承早期热液活动的基础上,有一定量方铅矿+闪锌矿热液叠加继承加入,后期随着构造裂隙的再次开放,外来的金-银矿物系列+重晶石矿液上升,沿裂隙注入沉淀交代,形成填隙、碎裂、溶蚀交代、包含等结构,角砾状、脉状构造;本阶段生成的矿物以重晶石、金银矿物居多,其次为方铅矿、闪锌矿等。属主要成矿阶段。

(3) 重晶石-碳酸盐阶段:本阶段发生以含重晶石为主的少量热液活动,造成矿体及围岩内常有重晶石及有用物质(Au、Ag)细脉沿裂隙充填成脉体,同时侵切前 2 个阶段的成矿产物,并伴随重晶石化、碳酸盐化和少量多金属化(Au、Ag、Pb)现象。但范围局限。应为晚期成矿阶段。

总之,本矿床矿化作用十分复杂,具多组分、多期次长期重叠改造的特点。矿石中黄铁矿生成最早,闪锌矿次之,方铅矿在后,重晶石、金-银矿物最晚。总体反映出含矿热液以构造动力作用生成的岩石裂隙中充填、沉淀的成矿作用为主。

表 1 成矿期、成矿阶段、矿物生成顺序表

Tab. 1 Mineralization period, Mineralization stage, and mineral build order

矿物	成矿期		
	石英-黄铁矿-闪锌矿阶段	金-银-重晶石阶段	重晶石-碳酸盐阶段
石英
绢云母
黄铁矿
黄铜矿
闪锌矿
方铅矿
金银
重晶石
碳酸盐

3.5 成矿规律

通过对矿床蚀变带、矿体、矿化阶段及成矿过程等方面系统研究,总结出 4 点成矿规律。

(1) 在矿床内共圈定矿化蚀变带 11 条,已知矿体均赋存其内。各蚀变带产状在倾向、倾角上与火

山岩面理均有 $5^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 交角,且蚀变带倾角陡于火山岩面理,在走向上明显穿过火山岩层界限,说明蚀变带形成时间比火山岩面理发育时间晚;从蚀变带内残留的构造行迹分析,蚀变带应由挤压构造破碎带(成矿前断裂)演变而来。故可以确认,矿体形态主要受构造因素控制。

(2)矿床内金-银-铅-锌-重晶石矿体产出位置均相对较浅,而锌矿体则多赋存在蚀变带较深地段。其中,最具工业价值的金-银-铅-锌-重晶石同体共生矿体出于各矿化蚀变带较浅地带的现象可能反映其生成最晚,是又一次热动力作用叠加改造的结果。如AuAgI-1、AuAgVII-1以850 m标高以上最为富集,在750 m标高上下呈平行斜列产出,并多具平面上成群、成条(带)状平行产出,剖面上呈顺时针平行斜列展布,斜列间距20~60 m(图2、图3、图4)。

(3)从有益元素矿化范围和矿体规模来看,矿床的硫矿化范围最广,重晶石(硫酸钡)矿化范围最小,居于两者之间的依次是锌矿化、铅矿化、金矿化和银矿化。上述成矿元素矿化范围和矿体规模的关系为: $S>Zn>Pb>Au>Ag>BaSO_4$;其次,从矿床有益元素品位等值线图(矿体纵投影图)分析,在锌矿化早期没有或仅有极少量Pb元素参加;晚期铅锌矿化只在前期锌矿化范围内局部叠加。另外,铅与金、银和重晶石的关系密切,表现为金银和重晶石矿化范围一致。综合分析,发现Au、Ag、Ba元素的生成时间最晚,经常紧密共生,是晚期热动力作用(构造热液)叠加的结果。

(4)矿床的形成与火山作用关系密切,其成矿过程主要历经3个阶段:①初始成矿阶段。在中一新元古代,由于区域长期而强烈的海底火山喷发活动,在区内形成了碧口岩群岛弧火山岩,在岩浆演化喷气-喷液阶段,携带大量有益硫化物组分在有利空间(挤压破碎带)初步就位,现今矿体行迹仍保留了原岩火山碎屑结构及压扁定向千枚状构造;同时,也生成了以黄铁矿-闪锌矿化为特征的简单低品位的锌硫矿石。②中期主要成矿阶段。到火山活动中期,区内叠加继承发生了构造热液活动;在初始矿化地段及附近,由于构造应力作用方向、方式的变化,生成了压扭局部兼张的构造形变,形成相对开阔的空间;这时除了使围岩中硫化物再次改造富集外,主要以外来的金-银-重晶石矿液贯入充填为主;因此,矿石的填隙、交代、碎裂、包含等结构及角砾状、脉状构造发育;并生成了以重晶石化、多金属矿化为特征的

富含Au、Ag的铅锌钡矿石,矿化范围及强度极大超过前期,基本奠定了区内矿产的种属及规模。③成矿晚期阶段。进入火山活动晚期,虽仍有少量深部构造热液活动提供矿液,且继续有新物质加入,但区内构造环境已渐趋稳定;本阶段区内矿化普遍但不强烈,除了有用物质(Au、Ag)在局部形成小脉外,重晶石多以洁净、透亮的散粒遍及前蚀变带及附近;唯以活泼性强的碳酸盐化为主要蚀变,至该区结束了矿产生的全过程。

3.6 硫同位素组成

3.6.1 采样位置与分析方法

本次研究主要选择东沟坝多金属矿床中的黄铁矿、方铅矿、闪锌矿和重晶石矿物为测试对象,样品多采自东沟坝矿区岩心库,少量采自探槽和地表露头,共采取21件典型矿(岩)石,其中金-银-铅-锌-重晶石共生矿石9件,单锌矿石4件,矿化蚀变带(黄铁绢英岩)5件,围岩(凝灰含角斑岩)3件(表2)。

代表性单矿物的挑选在陕西省地质矿产实验研究所进行。将样品破碎后在双目镜下挑选0.5 g以上0.45~0.28 mm(40~60目)单矿物,纯度达99%以上,将提纯后的单矿物样品在玛瑙钵中继续磨至0.071 mm(200目)。样品硫同位素分析测试在吉林冶金研究所同位素实验室进行。硫同位素测试仪器为MAT-251气体同位素质谱计。检测方法和依据为DZ/T0184.14-1997《硫化物中硫同位素组成的测定》。测试结果相对标准为VCDT,记为 $\delta^{34}S_{V-CDT}$ 。标准偏差为0.2‰,硫化物参考标准物质为GBW-04414、GBW-04415硫化银标准,其 $\delta^{34}S$ 分别是一0.07‰±0.13‰和22.15‰±0.14‰。

3.6.2 分析结果

在东沟坝矿区选取的21件典型矿(岩)石硫同位素测试结果见表2、硫同位素测试值统计见表3。

由表2、表3可以看出,矿区硫化物样品的 $\delta^{34}S$ 值均为正值,各种硫化物的 $\delta^{34}S$ 变化范围集中于+0.0‰~16.2‰,平均值变化范围在+2.9‰~13.96‰,极差为2.4‰~6.8‰,均小于10‰,离散度小,总体反映岩矿石中硫化物 $\delta^{34}S$ 值变化范围稍大。

其中,方铅矿 $\delta^{34}S$ 变化范围为+0.0‰~6.3‰,平均值为+2.9‰;闪锌矿 $\delta^{34}S$ 变化范围为+4.1‰~6.5‰,平均值为+5.4‰;黄铁矿 $\delta^{34}S$ 变化范围为+5.8‰~11.6‰,平均值为+8.8‰;重晶石 $\delta^{34}S$ 变化范围为+11.9‰~16.2‰,平均值为+13.96‰。

表2 东沟坝矿床硫同位素测试结果表
Tab. 2 Sulfur isotopic composition of sulfides for Donggouba deposit

样品 编号	采样位置	$\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}(\text{‰})$				矿(岩) 石类型
		黄铁矿	方铅矿	闪锌矿	重晶石	
E2	ZK57(202 m)	+6.3				
DZ2	ZK57(215 m)	+5.8				
DZ32	ZK57(219 m)	+7.1	+1.3	+5.7	+11.9	
DZ31	TC801 露头	+11.5	+6.3		+16.2	金-银-铅-锌-重晶石 共生矿石
DZ4	ZK01(125 m)	+7.6				
DZ5	ZK01(134 m)	+6.7				
DZ30	ZK01(146 m)	+6.8	+4.0	+6.5	+13.8	
DZ29	ZK11(123 m)	+7.4	0.0	+4.1		
DZ28	ZK11(145 m)	+7.8				
S07	ZK16(225 m)	+10.3				
S03	ZK12(178 m)	+11.6				单锌矿石
S01	ZK14(268 m)	+11.2				
S06	ZK14(226 m)	+10.7				
DZ27	2 线地表	+9.5				
S09	ZK12(124 m)	+9.8				矿化蚀变带 (黄铁绢英岩)
S02	ZK14(151 m)	+10.1				
DZ26	ZK13 地表	+7.6				
DZ25	大坪露头	+13.6				
S08	ZK16(169 m)	+11.0				围岩 (凝灰含英角斑岩)
S10	TC13 露头	+4.2				
S11	TC501 露头	+8.2				

注:吉林冶金研究所同位素实验室测试(测试时间:2021年10月)。

表3 东沟坝矿床硫同位素测试结果统计表
Tab. 3 Sulfur isotopic composition of sulfides statistical date for Donggouba deposit

矿(岩)石类型	测试对象	$\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}(\text{‰})$		
		测试结果	平均值	极差
金-银-铅-锌-重晶石 共生矿石	方铅矿	0.0~+6.3	+2.9	6.3
	闪锌矿	+4.1~+6.5	+5.4	2.4
	重晶石	+11.9~+16.2	+13.96	4.3
	黄铁矿	+5.8~+11.5	+7.46	5.7
单锌矿石	黄铁矿	+7.8~+11.6	+10.32	3.8
矿化蚀变带(黄铁绢英岩)	黄铁矿	+7.6~+13.6	+10.12	6.0
围岩(凝灰含英角斑岩)	黄铁矿	+4.2~+11.0	+7.8	6.8

已有的研究表明,在热液体系中硫同位素分馏达到平衡时,矿床中共生硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 的富集程度按从大到小的顺序为黄铁矿>闪锌矿>黄铜矿>方铅矿(Saikai, 1968)。而东沟坝矿床硫化物的硫同位素组成具有 $\delta^{34}\text{S}$ 重晶石> $\delta^{34}\text{S}$ 黄铁矿> $\delta^{34}\text{S}$ 闪锌

矿> $\delta^{34}\text{S}$ 方铅矿特征,表明矿床形成时其硫同位素分馏已基本达到平衡。其次,Ohmoto等(1997)认为,在矿物组合简单的情况下,矿物的 $\delta^{34}\text{S}$ 平均值可代表热液的总硫值($\delta^{34}\text{S}_{\text{TS}}$)。而在高氧逸度并出现重晶石的条件下,重晶石的 $\delta^{34}\text{S}$ 值(平均为

13.96‰)大致相当于或略大于成矿溶液的 $\delta^{34}\text{S}$ 值,而硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值(平均为 7.60‰)显著低于成矿溶液的 $\delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}}$ 值。因此,推测成矿溶液的原始硫同位素组成应接近重晶石的 $\delta^{34}\text{S}$ 值(13.96‰)。

4 讨论

4.1 成矿物质来源

硫同位素是成矿物质来源、成矿流体迁移过程及矿床成因的灵敏指示剂(Ohmoto et al., 1997)。已有的研究表明,硫同位素在矿床学研究中主要作为地质温度计和示踪成矿物质来源,而金属矿床的矿床演化历史可以通过主要金属矿物硫同位素组成来反映(Stein and Hannah, 1985),硫同位素在研究成矿物质来源、成矿模式等方面起着其他同位素不可替代的作用(陈岳龙, 2005)。由于本矿床黄铁矿、闪锌矿及方铅矿等矿物的亲硫性质,笔者尝试利用测得的硫同位素组成范围来判断硫源性质,从而示踪其流体及成矿物质的来源问题。

对于东沟坝多金属矿床而言,其硫同位素比值范围全为正值,硫同位素 $\delta^{34}\text{S}$ 变化于 0.0‰ ~ 16.2‰,平均变化范围在 2.9‰ ~ 13.96‰(表 2、表 3)。在硫同位素直方图中(图 7),反映矿床的硫同位素均发生了较大程度的分馏,主要表现出具花岗

质岩浆硫和变质岩硫同位素特征,只有少量比较靠近幔源硫范围。

通过分析,认为鉴于东沟坝矿床产于碧口岩群火山岩地层中,区域上仅经受了绿片岩相浅变质作用(徐学义等, 2014; 陕西省地质调查院, 2017),故硫元素不太可能来源于变质岩;加上矿区样品硫同位素 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值普遍具花岗质岩浆硫的特征(5% ~ 15%)(Ohmoto et al., 1997),仅有少量处于幔源硫(0‰ ~ 3‰)(Ohmoto et al., 1997; Hugh, 2000)的区间,表明东沟坝矿床成矿溶液中的 S 具有二重来源,但可能主要来源于下地壳岩浆源,仅有极少量的地幔物质混入(图 7)。该硫同位素分析结果与其他方法获得的研究结果(汪东波等, 1991; 刘永丰等, 1991)基本一致。

其次,根据前人对东沟坝开展的成矿压力、流体包裹体成分等研究资料(汪东波等, 1991; 刘永丰和李才一, 1991; 杨荣兴等, 1993; 陈升平等, 1994; 董广法等, 1998; 卢武长等, 1998; 丁振举等, 2003),反映出矿床成矿流体的特点为:成矿压力为 50 ~ 100MPa,盐度为 4.2% ~ 6.6% (NaCl),成矿热液 250℃ 以上的高温、高盐(4.2% ~ 6.6%) (NaCl)、中性(pH=6 ~ 7),在相对还原条件下(Eh 值为负值)成矿。另外,兼顾紧邻该区的铜厂(丁振举等, 1998; 王伟等, 2011)、陈家坝(丁振举等, 1998; 王瑞

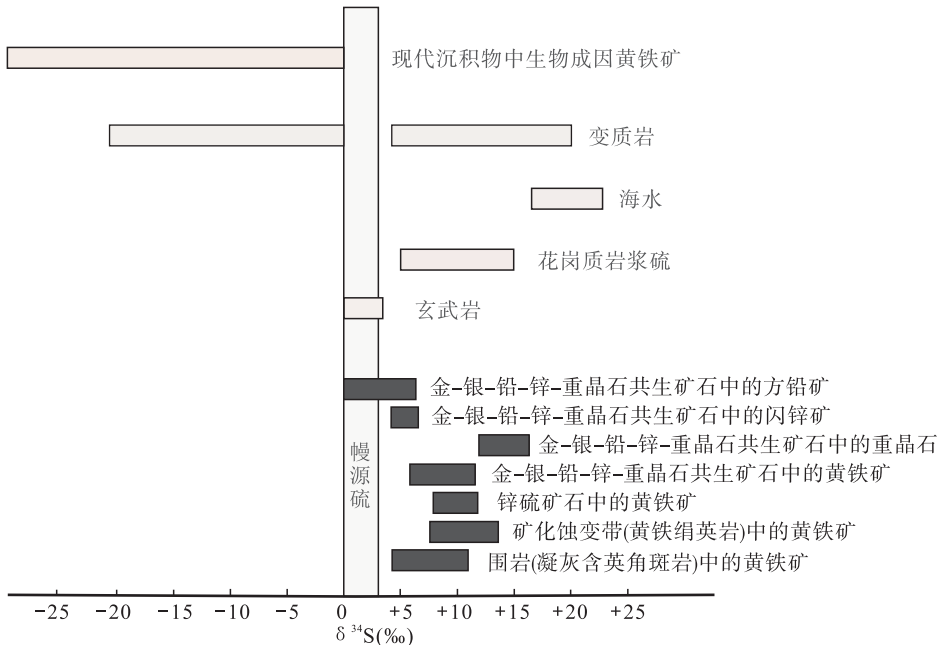


图 7 东沟坝矿床硫同位素直方图

Fig. 7 Histogram of sulfur isotope composition of sulfides from the Donggouba iron deposit

廷等,2004;王伟等,2011;丁坤,2017;王伟等,2018)等矿床金属成矿作用主要与新元古代火山岩浆活动密切相关的客观事实,也可充分佐证,说明东沟坝多金属成矿物质可能主要来自于晋宁期岛弧火山岩浆作用。

4.2 成矿构造环境

东沟坝矿床处于晋宁期古扬子东、西微板块沿硤口驿-黑木林中一新元古代基底拼合带汇聚的区域背景下,赋矿层位为基底拼合带汇聚碰撞而形成的岛弧火山岩,即碧口岩群阳坝岩组中酸性火山岩建造,也是“摩天岭地块”金、铜多金属的重要含矿层位(陕西省地质调查院,2017;陈彦文,2019)(图1)。

据区域岩石化学、地球化学研究成果显示,阳坝岩组火山岩主体属于拉斑-钙碱性过渡系列,具有岛弧火山沉积建造特点;其构造环境已厘定属岛弧海相火山岩环境,火山类型以喷溢相为主,次为爆发相(丁振举等,2003;陕西省地质调查院,2017);矿床的赋矿岩性主要为阳坝岩组上岩段($Pt_{31}y^3$)的凝灰含英角斑岩、集块含英角斑岩和中酸性火山凝灰岩。

总之,东沟坝矿区新元古代火山岩分布广泛,成矿与晋宁期火山岩浆作用密切相关。矿床形成于晋宁期活动陆缘背景下,构造-成矿演化处于前板块构造阶段(780~>2 500Ma),隶属于中一新元古代古陆块裂解-汇聚成矿地质事件(董王仓等,2019a;李维成等,2020);矿床类型属于与中酸性岛弧火山岩相关的矿床。

由于矿区紧邻“摩天岭地块”东部的硤口驿-黑木林中一新元古代基底拼合带北侧,从矿床成矿岩性、岩相及背景等方面综合分析,推测矿床的成岩、成矿过程是古扬子东、西部微板块碰撞过程中构造-岩浆活动的产物;可能与晋宁期古扬子东、西部微板块俯冲汇聚,以及后续构造叠加延续有关。

4.3 矿床成因

对东沟坝矿床的成因许多专家学者提出了自己的观点,如火山喷流沉积-受变质型(邱国柱等,1990;汪东波和李树新,1991),海相火山喷发-改造型(尹福光等,1999)等。笔者通过综合研究,认为东沟坝矿床 Au、Ag、Pb、Zn 等成矿物质可能主要来自晋宁期海相岛弧火山岩浆;矿脉主成矿期为富含 Au、Ag 硅化-重晶石化矿液贯入、叠加,成矿流体为火山岩浆有关的喷气-喷液(邱国柱等,1990);S 可能主要来源于下地壳岩浆源,硫同位素 $\delta^{34}S$ 平均变

化范围在 +2.9‰~13.96‰(本文);成矿热液为 250℃ 以上的高中温、高盐(4.2‰~6.6‰)(NaCl)、中性(pH=6~7),在相对还原条件下(Eh 值为负值)成矿(汪东波,1991;卢武长等,1998;丁振举等,2003)。笔者通过实地考察研究,认为其间经历的多期、多阶段的构造热液叠加、改造活动可能对矿床最终形成起着关键作用。

综上所述,东沟坝矿床属于晋宁期海相含矿中酸性火山岩浆热液在多次构造作用叠加形成的矿床。参照国内外重要矿床类型的矿床模型特点(陈毓川等,1993;裴荣富,1995;毛景文等,2012)及划分原则(毛景文等,2012),结合东沟坝矿床成矿构造背景、时空分布规律、成矿作用等特征,发现东沟坝矿床明显是赋存于以火山岩为主的环境,含矿硫化物是以层(脉)状形式形成的矿物集合体,其在空间上、时间上和成因上与同时代的火山作用密切相关(毛景文等,2012),故认为应属于典型的火山块状硫化物型(Volcanic Massive Sulfide, VMS)金-银-铅-锌多金属矿床。

5 结论

(1)东沟坝矿床产于新元古代碧口岩群岛弧火山岩中,具多期矿化叠加特征。成矿期次主要包括3个阶段:①石英-黄铁矿-闪锌矿初始预富集成矿阶段。②金-银-重晶石主要成矿阶段。③重晶石-碳酸盐晚期成矿阶段。

(2)矿(岩)石硫同位素具 $\delta^{34}S$ 重晶石 $>$ $\delta^{34}S$ 黄铁矿 $>$ $\delta^{34}S$ 闪锌矿 $>$ $\delta^{34}S$ 方铅矿的特征,证明矿床形成时硫同位素分馏已基本达到平衡;硫同位素 $\delta^{34}S_{V-CDT}$ 值普遍具花岗质岩浆硫特征,仅有少量处于幔源硫区间,表明东沟坝矿床 S 可能主要来源于下地壳岩浆源,仅有少量的地幔物质混入;而其成矿物质可能主要来自于晋宁期岛弧火山岩浆作用。

(3)东沟坝矿床是晋宁期海相含矿中酸性火山岩浆热液在多期构造作用叠加下形成的,成因类型属于典型的火山块状硫化物型(Volcanic Massive Sulfide, VMS)金-银-铅-锌多金属矿床。

(4)东沟坝矿床形成于晋宁期活动陆缘背景下,隶属中一新元古代古陆块裂解-汇聚成矿地质事件,从成矿岩性、岩相及背景等方面综合分析,推测矿床的成岩、成矿过程可能与晋宁期古扬子东、西部微板

块俯冲汇聚,以及后续构造叠加延续有关。

致谢:在本文撰稿过程中,得到了陕西地矿汉中地质大队有限公司高福平总工程师的大力支持;在后期修改中,中国地质调查局西安地质调查中心陈隽璐研究员、《西北地质》编辑部吕鹏瑞主任及匿名审稿专家均提出了中肯而深刻的意见,才使得本文质量有了全面提升,在此一并深表谢意!

参考文献(References):

谢元清. 陕西省略阳县东沟坝金银铅锌多金属矿床勘探地质报告[R]. 汉中:陕西地矿局第二地质队,1991.

王兴堂. 陕西省略阳县东沟坝金银铅锌多金属矿床资源/储量核实报告[R]. 西安:陕西鑫源勘探有限责任公司,2010.

徐学义,陈隽璐,张二朋,等. 秦岭及邻区地质图说明书[M]. 西安:西安地图出版社,2014:1-89.

XU Xueyi, CHEN Junlu, ZHANG Erpeng, et al. Geological Map and Specification of Qinling and its adjacent areas [M]. Xi'an: Xi'an Map Publishing House, 2014: 1-89.

陕西省地质调查院. 中国区域地质志·陕西志[M]. 北京:地质出版社,2017:1-1120.

Shaanxi Institute of Geological Survey. Regional Geology of China · Shaanxi [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2017:1-1120.

王洪亮,徐学义,陈隽璐,等. 南秦岭略阳鱼洞子岩群磁铁石英岩形成时代的锆石 U - Pb 年代学约束[J]. 地质学报,2011,85(8):1284-1290.

WANG Hongliang, XU Xueyi, CHEN Junlu, et al. Constraints from Zircon U - Pb Chronology of Yudongzi Group Magnetite Quartzite in the Lueyang Area, Southern Qinling, China[J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(8):1284-1290.

秦克令,何世平,宋述光. 碧口地体同位素地质年代学及其意义[J]. 西北地质科学,1992,13(2):97-110.

QIN Keling, HE Shiping, SONG Shuguang. Isotopic Geochronology and its Significance in Bikou Terrain, China [J]. Northwest Geoscience, 1992, 13(2):97-110.

张宗清,张国伟,唐索寒,等. 鱼洞子群变质岩年龄及秦岭造山带太古宙基底[J]. 地质学报,2001,75(2):198-204.

ZHANG Zongqing, ZHANG Guowei, TANG Suohan, et al. On The age of Metamorphic Rocks of the Yudongzi Group And the Archean Crystalline Basement of the Qinling orogen [J]. Acta Geologica Sinica, 2001, 75(2):198-204.

张欣,徐学义,宋公社,等. 西秦岭略阳地区鱼洞子杂岩变形花岗岩 LA - ICP - MS 测年及地质意义[J]. 地质通报,

2010,29(4):510-517.

ZHANG Xin, XU Xueyi, SONG Gongshe, et al. LA - ICP - MS U - Pb dating and significance of Yudongzi Group deformation granite from Lueyang area, western Qinling, China [J]. Geological Bulletin of China, 2010, 29(4):510-517.

闫全人,王宗起,闫臻,等. 碧口群火山岩的时代 SHRIMP 锆石 U - Pb 测年结果[J]. 地质通报,2003,22(6):456-458.

YAN Quanren, WANG Zongqi, YAN Zhen, et al. The age SHRIMP zircon U - Pb dating results of the volcanic rocks of the Bikou Group [J]. Geological Bulletin of China, 2003, 22(6):456-458.

卢武长,杨绍全,张萍. 东沟坝多金属矿床硫同位素交换动力学[J]. 矿物岩石,1997,17(1):105-110.

LU Wuchang, YANG Shaoquan, ZHANG Ping. Kinetics of Sulfur Isotopic exchange in Multimetal ore deposit, Donggouba [J]. Mineralogy and Petrology, 1997, 17(1):105-110.

卢武长,张萍,杨绍全. 东沟坝多金属矿床同位素地质特征[J]. 成都理工大学学报,1998,25(3):447-456.

LU Wuchang, ZHANG Ping, YANG Shaoquan. Isotopic-Geological features of the Donggouba Multimetal deposit [J]. Journal of Chengdu University of Technology, 1998, 25(3):447-456.

邱国柱,陶喜森. 陕西东沟坝金银多金属矿床形成条件成矿机制及成矿模式探讨[J]. 陕西地质,1990,8(2):1-13.

QIU Guozhu, TAO Xinsen. Discussion on the Metallogenic conditions, Mechanism and the model of the Donggouba Au - Ag polymetallic deposit in Shaanxi Province [J]. Geology of Shaanxi, 1990, 8(2):1-13.

汪东波,李树新. 略阳东沟坝金、银、铅、锌、黄铁矿-重晶石型矿床的成因-成矿物理化学条件及稳定同位素地球化学研究[J]. 西北地质,1991,12(3):25-32.

WANG Dongbo, LI Shuxin. The genesis of the Donggouba gold, silver, lead, zinc, pyrite-barite type deposits in Lueyang: physical and chemical conditions of metallogenesis and stable isotope geochemistry [J]. Northwestern Geology, 1991, 12(3):25-32.

杨荣兴. 陕南东沟坝地区中酸性海相火山岩的变质作用[J]. 桂林冶金地质学院报,1993,13(1):24-33.

YANG Rongxing. Metamorphism of Marine Facies Volcanic Rocks in the Donggouba Area, Southern Shaanxi [J]. Journal of Guilin College of Geology, 1993, 13(1):24-33.

丁振举,刘丛强,姚书振,等. 东沟坝多金属矿床矿质来源的稀土元素地球化学限制[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2003,33(4):437-442.

DING Zhenju, LIU Congqiang, YAO Shuzhen, et al. The

- REE Constraints on Ore Sources of the Donggouba Polymetallic Deposit [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2003, 33(4): 437-442.
- 丁振举, 姚书振, 刘丛强, 等. 东沟坝多金属矿床喷流沉积成矿特征的稀土元素地球化学示踪[J]. *岩石学报*, 2003, 19(4): 792-798.
- DING Zhenju, YAO Shuzhen, LIU Congqiang, et al. The characteristics of exhalation-dedimentary deposit of Donggouba polymetal deposit: Evidence from ore's REE composition[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2003, 19(4): 792-798.
- 刘永丰, 李才一. 陕西略阳东沟坝黄铁矿型金银多金属矿床成矿物理化学条件研究[J]. *矿物岩石*, 1991, 11(2): 55-64.
- LIU Yongfeng, LI Caiyi. Study of Physical and Chemical Condition Controlling Ore Formation of the Gold, Silver, Base-Metal Ore Deposit of Pyrite-Type in Donggouba, Lueyang, Shanxi [J]. *Mineralogy and Petrology*, 1991, 11(2): 55-64.
- 陈升平, 肖克炎, 吴有才. 陕西东沟坝金银矿床黄铁矿标型性研究[J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 1994, 19(1): 43-51.
- CHEN Shengping, XIAO Keyan, WU Youcai. Study on Pyrite Typomorphic Peculiarities of Donggouba Gold-Silver Deposit, Shaanxi [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 1994, 19(1): 43-51.
- 尹福光, 唐文清. 陕西略阳东沟坝金银铅锌多金属矿床成因[J]. *特提斯地质*, 1999, 23: 96-102.
- YIN Fuguang, TANG Wenqing. The Genesis of the Donggouba Gold, Silver, Lead and Zinc Polymetallic Ore Deposit in Lueyang, Shaanxi [J]. *Tethyan Geology*, 1999, 23: 96-102.
- 董广法, 王国富, 刘继顺. 勉略宁地区东沟坝组火山岩的成因浅析[J]. *大地构造与成矿学*, 1998, 22(2): 163-169.
- DONG Guangfa, WANG Guofu, LIU Jishun. Tectonic Environment Analysis of Volcanic Rocks From the Donggouba Group of the Mian Lvening [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 1998, 22(2): 163-169.
- 丁振举, 姚书振, 周宗桂, 等. 陕西略阳铜厂铜矿成矿时代及地质意义[J]. *西安工程学院学报*, 1998, 20(3): 24-27.
- DING Zhenju, LIU Congqiang, ZHOU Zonggui, et al. Metallogenic chronology and its geologic significance of Tongchang copper ore deposit [J]. *Journal of Xi'an Engineering University*, 1998, 20(3): 24-27.
- 王伟, 刘树文, 吴峰辉, 等. 陕南铜厂闪长岩体的成岩、成矿时代及其地质意义[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2011, 47(1): 91-102.
- WANG Wei, LIU Shuwen, WU Fenghui, et al. Emplaced and Metallogenic Times of Tongchang Diorites, Southern Shaanxi Province and Its Geological Implications [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2011, 47(1): 91-102.
- 丁坤, 王瑞廷, 钱壮志, 等. 陕西省陈家坝铜铅锌多金属矿床地质地球化学特征及矿床成因探讨[J]. *地质与勘探*, 2017, 53(3): 436-444.
- DING Kun, WANG Ruiting, QIAN Zhuangzhi, et al. Geochemical characteristics and ore genesis of the Chenjiaba Cu-Pb-Zn polymetallic deposit, Shaanxi Province [J]. *Geology and Exploration*, 2017, 53(3): 436-444.
- 丁坤, 王瑞廷, 钱壮志, 等. 陕西略阳陈家坝铜铅锌多金属矿床硫化物微量元素和硫同位素地球化学特征[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2018, 37(2): 326-333.
- DING Kun, WANG Ruiting, QIAN Zhuangzhi, et al. Geochemical Characteristics of Trace Elements and Sulfur Isotopes of Sulfides from the Chenjiaba Cu-Pb-Zn Polymetallic Deposit, Lueyang County, Shaanxi Province [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2018, 37(2): 326-333.
- 王瑞廷, 旺军谊, 李福让, 等. 勉-略-宁多金属矿集区铜厂-徐家坝铜矿带地质地球化学特征[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2004, 23(S1): 69-71.
- WANG Ruiting, WANG Junyi, LI Furang, et al. Geological and geochemical characteristics of The Tongchang-Xujiaba copper belt in the Mian Lvening polymetallic ore concentration area [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2004, 23(S1): 69-71.
- 赵祥生, 马少龙, 邹湘华, 等. 秦巴地区碧口群时代层序、火山作用及含矿性研究[J]. *中国地质科学院西安地质矿产研究所刊*, 1990, 29.
- ZHAO Xiangsheng, MA Shaolong, ZOU Xianghua, et al. Study on the chronological sequence, volcanism and mineralization of the Bikou Group in Qinba area [J]. *Journal of Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences*, 1990, 29.
- 吴闻人, 王根宝, 岳康茂, 等. 陕西勉略宁地区碧口群海相火山岩系对金铜和含金银多金属矿产的控矿因素、成矿规律、找矿标志、成矿预测研究报告[R]. 陕西地矿局综合研究队, 西安地质矿产研究所, 1995.
- WU Wenren, WANG Genbao, YUE Kangmao, et al. Research report on the ore-controlling factors, metallogenic laws, prospecting signs, and metallogenic prediction of the Bikou Group marine volcanic rock series in the Mianluening area of Shaanxi on the gold-copper and gold-silver-bearing polymetallic minerals [R]. Comprehensive Research Team of Shaanxi Bureau of Geology and Mineral Resources, Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources, 1995.
- 王根宝, 吴闻人. 陕西省勉略宁地区碧口群基底构造碰合带的发现及其意义[J]. *陕西地质科技情报*, 1995, 20(1):

- 13-26.
- WANG Genbao, WU Wenren. Discovery of the basement tectonic collision zone of the Bikou Group in Mianlue-nueing area, Shaanxi Province and its significance [J]. Shaanxi Geological Science and Technology Information, 1995, 20(1):13-26.
- 王根宝, 崔继岗, 张升全, 等. 陕西勉略宁三角区基本地质组成及演化[J]. 西北地质科学, 1996, 17(2):11-17.
- WANG Genbao, CUI Jigang, ZHANG Shengquan, et al. Basic geological composition and Evolution of the Mianlue-nueing, Shaanxi [J]. Northwest Geoscience, 1996, 11(2):11-17.
- 丁坤, 梁婷, 王瑞廷, 等. 陕南勉略阳地区陈家坝铜铅锌多金属矿床稀土元素地球化学特征[J]. 西北地质, 2018, 51(3):93-104.
- DING Kun, LIANG Ting, WANG Ruiting, et al. REE Characteristics of the Chenjiaba Cu - Pb - Zn Polymetallic Deposit in Mian-Lue-Yang Area, Southern Shaanxi Province [J]. Northwestern Geology, 2018, 51(3):93-104.
- 陈彦文. 甘肃碧口地区金铜矿地质特征及找矿潜力浅析[J]. 西北地质, 2019, 52(1):206-220.
- CHEN Yanwen. Geological Characteristics and Ore-prospecting Potential of Gold-Copper Deposits in Bikou Area, Gansu Province [J]. Northwestern Geology, 2019, 52(1):206-220.
- 张拴厚, 韩芳林, 王根宝, 等. 秦岭造山带晋宁期加里东期板块汇聚及成矿关系[J]. 陕西地质, 2010, (2), 28(2):1-10.
- ZHANG Shuanhou, HAN Fanglin, WANG Genbao, et al. The Jinning Caledonian Plate Convergence and Metallogenic Relationship in the Qinling Orogenic Belt [J]. Shaanxi Geology, 2010, (2), 28(2):1-10.
- 李维成, 董晨, 董王仓, 等. 陕西区域成矿规律及其与重大成矿地质事件之关系[J]. 地质学报, 2020, 94(1):65-83.
- LI Weicheng, DONG Chen, DONG Wangcang, et al. A discussion on the relationship between regional metallogenic regularity and metallogenic geological events in Shaanxi Province [J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(1):65-83.
- 董王仓, 李维成, 周小康, 等. 中国矿产地质志·陕西卷·金属矿产(待出版)[M]. 2019a.
- DONG Wangcang, LI Weicheng, ZHOU Xiaokang, et al. Mineral Geology of China, Shaanxi Volume, Metal Minerals(to be published)[M]. 2019a.
- 徐学义, 夏祖春, 夏林圻, 等. 碧口群火山旋回及其地质构造意义[J]. 地质通报, 2002, 21(8-9):478-485.
- XU Xueyi, XIA Zuchun, XIA Linqi, et al. Volcanic Cycle of Bikou Group and Its Geological Tectonic Significance [J]. Geological Bulletin, 2002, 21(8-9):478-485.
- 闫全人, Andrew D. Hanson, 王宗起. 扬子板块北缘碧口群火山岩的地球化学特征及其构造环境[J]. 岩石矿物学杂志, 2004, 23(01):1-11.
- YAN Quanren, Andrew D. Hanson, WANG Zongqi. Geochemical characteristics and tectonic environment of the volcanic rocks in the Bikou Group on the northern margin of the Yangtze Plate [J]. Journal of Rock and Mineralogy, 2004, 23(01):1-11.
- 陈岳龙, 杨忠芳, 赵志丹. 同位素地质年代学与地球化学[M]. 北京:地质出版社, 2005:1-446.
- CHEN Yuelong, YANG Zhongfang, ZHAO Zhidan. Isotopic geochronology and geochemistry [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2005:1-446.
- 陈毓川, 朱裕生. 中国矿床成矿模式[M]. 北京:地质出版社, 1993:1-367.
- CHEN Yuchuan, ZHU Yusheng. Metallogenic model of Ore deposits in China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993:1-367.
- 裴荣富. 中国矿床模式[M]. 北京:地质出版社, 1995:1-357.
- PEI Rongfu. Chinese deposit model [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1995:1-357.
- 毛景文, 张作衡, 王义天, 等. 国外主要矿床类型、特点及找矿勘查[M]. 北京:地质出版社, 2012:1-480.
- MAO Jingwen, ZHANG Zuoheng, WANG Yitian, et al. Mineral deposits: Types, Characteristics and explorations [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2012:1-480.
- Hugh R R. 岩石地球化学[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社, 2000:1-243.
- Hugh R R. Petrogeochemistry [M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2000:1-243.
- Saikai H. Isotopic properties of sulfur compounds in hydrothermal processes [J]. Geochemical Journal, 1968, 12:29-49.
- Stein H J, Hannah J L. Movement and origin of ore fluids in Climax type systems [J]. Geology, 1985, 13(7):469-474.
- Ohmoto H and Rye R O. Isotopes of sulfur and carbon [A]. In: Barnes H L, ed. Geochemistry of hydrothermal ore deposits [C]. New York: John Wiley and Sons, 1979, 509-567.
- Hoefs J. Stable isotope geochemistry [M]. 4th Edition. Berlin:Spring Verlag. 1997, 1-250.